# مطالعۀ آزمایشگاهی و عددی پایداری شیب ماسه‌ای با استفاده از ستون سنگی مسلح با ورقه‌های افقی ژئوتکستایل★

محمد حاجی‌عزیزی[۱] مسعود نصیری[۲]

**چکیده** هدف از انجام این پژوهش، مطالعۀ آزمایشگاهیِ بررسی عملکرد ستون سنگی معمولی و ستون سنگی مسلح با ورقه‌های افقی ژئوتکستایل در پایدارسازی شیب‌های خاکی ماسه‌ای می‌باشد. مدل شیب ماسه‌ای پس از ساخت از طریق بارش اشباع شده و با نصب ستون سنگی معمولی و ستون سنگی مسلح با ورقه‌های افقی ژئوتکستایل درون آن، مسلح شده است و در نهایت تاج شیب بارگذاری شده است. نتایج به دست آمده با استفاده از روش تفاضل محدود سه‌بعدی ($FLAC^{3D}$) نیز مورد تأیید قرار گرفته‌اند. نتایجِ مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی و تحلیل‌های عددی، نشان داده‌اند که ستون سنگی مسلح با ژئوتکستایل در وسط شیب ماسه‌ای تأثیر چشم‌گیری در افزایش پایداری شیروانی مسلح دارد؛ به‌طوری که ستون سنگی مسلح مقاومت برشی شیب ماسه‌ای را ۱/۵ برابر نسبت به ستون سنگی معولی افزایش می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی** شیب ماسه‌ای، پایدارسازی، ستون سنگی، ژئوتکستایل.

# Experimental and Numerical Investigation on Stability of Reinforced Sandy Slope using Reinforced Stone Column with Horizontally Laminated Geotextile Disks

M. Hajiazizi M. Nasiri

**Abstract** *The aim of this research is to experimentally investigation of ordinary stone column and reinforced stone column using horizontally laminated geotextile disks in stabilizing sandy slopes. The sand slope model saturated through precipitation and reinforced by installing ordinary stone column and horizontal layers of geotextile within the stone column, and then slope crest undergo loading. Accuracy of experimental results confirmed using 3-D finite difference method ($FLAC^{3D}$). Both experimental and numerical results show that geotextile reinforced stone column in the middle of sandy slope have an impressive impact on increasing stability of reinforced slope. In such way that reinforced stone column, increase shear strength of sandy slope up to 1.5 times more than ordinary stone column.*

**Key Words** Sandy Slope, Stabilization, Stone Column, Laminated Geotextile Disks.

---

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۵/۱۱/۱۸ و تاریخ پذیرش آن ۹۷/٤/۲۳ می‌باشد.

(۱) دانشیار مهندسی عمران، دانشکدۀ فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه.

(۲) دانشجوی دکتری مهندسی عمران– ژئوتکنیک، دانشکدۀ فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه.

**Email**: mhazizi@yahoo.com

## مقدمه

در طول سالیان، موضوع تثبیت شیب‌های خاکی یکی از مسائلِ حائز اهمیت برای تحقیقات علمی بوده و توجهات بسیار زیادی را در سرتاسر دنیا به خود جلب کرده است. به‌طور کلی، شیوه‌های پایدارسازی یا نیروهای محرک را کاهش می‌دهند، یا نیروهای مقاوم را افزایش می‌دهند، و یا هر دوی این عملکردها را باهم دارند. پایدارسازی شیب‌ها می‌تواند با روش‌های متعددی از جمله تغییر هندسهٔ سطح شیب (خاک‌ریزی پایین‌دست یا خاک‌برداری بالادست شیب)، استفاده از مسلح‌کننده‌های خاک و یا نصبِ اعضای باربرِ سازه‌ای همانند ستون‌های سنگی افزایش یابد. ستون‌های سنگی اعضای باربرِ سازه‌ای محسوب می‌شوند که می‌توانند سببِ افزایش ضریب اطمینان شیروانی‌های خاکی شوند؛ این روشِ پایدارسازی، علاوه‌بر سادگی و راحتی اجرا در نواحی شیب‌ها، از نقطه‌نظرِ اقتصادی نیز نسبت به سایر روش‌های متداولِ اجرایی، مقرون به صرفه است. ستون‌های سنگی می‌توانند سببِ افزایش ظرفیت باربری، کاهش میزانِ نرخ نشست، افزایش مقاومت برشی خاکِ پیرامونی، کنترل روانگرایی و ایجاد شرایطِ زهکشی شوند. ستون‌های سنگی به عنوان اعضای مقاومی عمل می‌کنند که عموماً در معرض نیروهای جانبی قرار دارند، بنابراین استفاده از پوشش ژئوتکستایل به عنوان ورقه‌های افقی درونِ ستون سنگی، سبب افزایشِ مقاومت برشی ستون سنگی و در نتیجه، افزایش مقاومت برشی خاکِ پیرامون آن می‌شود.

تاریخچهٔ استفاده از ستون‌های سنگی به سال ۱۸۳۰ برمی‌گردد [1]. مطالعات آزمایشگاهی و تحلیل‌های عددی نشان داده‌است که علت اصلی بهبودِ خاکِ مسلح‌شده با ستون سنگی، سختی بالاتر ستون سنگی نسبت به خاک اطرافش می‌باشد [2]. ستون‌های سنگی قابلیت استفاده به منظور پایدارسازی و جلوگیری از وقوع زمین لغزش را نیز دارند [3]. تثبیتِ شیب‌های خاکیِ اطراف بزرگ‌راهایی هم‌چون آلاسکا، کالیفرنیا، فلوریدا، آیووا، کنتاتکی، می‌سی‌سی‌پی، نیویورک، تگزاس، داکوتای جنوبی، ویرجینیا و ویسکونسین به کمک ستون‌های سنگی انجام شده‌است [4]. ظرفیت باربری و نشستِ شیروانی خاکی مسلح با ستون سنگی به کمک مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی توسط وکلی و همکاران انجام شده‌است [5]. تأثیر و کاراییِ ظرفیت باربری ستون‌های سنگی به تنش جانبی وابسته است و در برخی خاک‌ها لازم است تا محصور کنندگی اضافی برای آن فراهم شود که در این زمینه، شیوه‌های متفاوتی برای بهبودِ عملکرد ستون‌های سنگی پیشنهاد شده است. ابوشی و همکاران [3]، قسمت بالایی ستون سنگی را با پوشش فلزی مسلح کرده‌اند. رائو و بهندری [6] استفاده از دوغاب سیمان را برای جلوگیری از شکم‌دادگی ستون سنگی پیشنهاد داده‌اند. ژوران و ریکوبونو [7] پیشنهاد کرده‌اند که قسمتِ بالای ستون سنگی با سیمان مخلوط شود. استفاده از لایه‌های ژئوگرید نیز برای بهبود عملکرد ستون‌های سنگی پیشنهاد شده‌است [1, 8, 9]. روش مؤثر دیگر برای فراهم کردن فشار محصورکنندگیِ مورد نیاز به منظور افزایش ظرفیت باربری ستون‌های سنگی، استفاده از لایه‌های مسلح‌کنندهٔ ژئوتکستایل می‌باشد. ایدهٔ ستون سنگی مسلح با پیچیدن لایهٔ ژئوتکستایل به دورِ آن برای اولین بار توسط ون ایمپ [10] ارائه شده است. کتی و همکاران [11] اثرات تسلیحی پیچیدن ژئوتکستایل به دور شمع‌های ماسهٔ فشرده را بررسی کرده‌اند. آزمایش‌های فشاری محصور نشده و سه‌محوری بر روی ستون‌های سنگی مسلح با ژئوتکستایل، بهبود عملکرد این پوشش را اثبات کرده است [12]. تحقیقات فردوسی شاهاندشتی و همکاران [۱۳] نشان داد که افزایش میزان سختی ژئوسنتتیک‌ها می‌تواند سببِ کاهشِ تغییر مکان‌ها شود. نتایج تحلیل‌های عددی برروی خاکریز مسلح با ژئوتکستایل، بهبود کارکردِ خاکریز را نشان داده است [۱٤].

مدل‌های تحلیلی برای آنالیزهای عددی ستون سنگی مسلح با ژئوتکستایل توسط محققان متعددی ارائه شده‌است [19-15]. بررسی عملکرد ستون‌های سنگی مسلح با ژئوسنتتیک‌ها به کمک روش‌های عددی مورد توجه پژوهشگران زیادی قرار گرفته است [26-20] و تحلیل تغییر شکل ستون‌های سنگی مسلح با ژئوسنتتیک بررسی شده است [34-27]. کمپفرت [35] با مطالعه بر روی کارایی ستون‌های مسلح، بهبود عملکرد این ستون‌ها را در مقابل ستون‌های سنگی معمولی نشان داده است. موروگسان و راجاگوپل [36] مجموعه‌ای از آزمایش‌های بارگذاری روی ستون‌های سنگی معمولی و ستون‌های سنگی مسلح انجام داده‌اند و به نتایج مطلوبی در این زمینه دست یافته‌اند. براساس نتایج تحقیقات حسین‌پور و همکاران [37] می‌توان گفت با استفاده از ژئوسنتتیک، تنش قائم بسیج شده روی ستون افزایش می‌یابد، تنش قائم روی خاکِ اطراف کاهش پیدا می‌کند و پوشش افقی ورقه‌های ژئوتکستایل سبب کاهش میزان نشست می‌شود. تحقیقات نظری افشار و قضاوی [38] نشان می‌دهد که شکم‌دادگی جانبی در ستون‌های سنگی مسلح با ژئوتکستایل به دلیل محصورشدگی جانبی اضافی که توسط ژئوتسکتایل فراهم می‌شود، کمتر از ستون‌های سنگی معمولی است و لایه‌های افقی ژئوتکستایل این ویژگی را دارند که اگر یکی از ورقه‌های مسلح‌کننده در نصب یا بارگذاری دچار آسیب شود، لایه‌های دیگر به نقش تسلیحی خود ادامه دهند. نتایج تحقیقات هونگ و همکاران [39] نشان داده است که ستون‌های سنگی مسلح شده با ژئوتکستایل در زمان گسیختگی، ظرفیت باربری بیشتری نسبت به ستون‌های سنگی معمولی دارند.

علی‌رغم تحقیقات گسترده‌ای که در زمینهٔ ستون‌های سنگی مسلح با ژئوتکستایل به آنها اشاره شد، استفاده از این پوشش، در مسلح‌سازی و افزایشِ پایداری شیب‌های خاکی مورد مطالعه قرار نگرفته است و به عنوان راهکاری جدید، در این مطالعهٔ آزمایشگاهی، استفاده از این شیوه در مسلح‌سازی شیب ماسه‌ای معرفی می‌گردد و به همین منظور یک سری مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی انجام گرفته است و نتایج به دست‌آمده با روش تفاضل محدودِ سه‌بعدی ($FLAC^{3D}$) نیز مقایسه گردیده است. ذکر این نکته ضروری می‌باشد که در این پژوهش، هدف گسیختگی شیب و ایجاد تغییر شکل‌های پلاستیک در آن است و کرنش‌های کوچک و تغییر شکل‌های الاستیکِ به وجود آمده در شیب مورد توجه نخواهند بود.

## مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی

### جعبهٔ آزمایش

جعبهٔ آزمایش شامل پنج قسمت می‌باشد که عبارتند از: سیستم تأمین آب، محل ساخت مدل، قسمت زهکشی آب، تابلوهای پیزومتر و سیستم بارگذاری. جداره‌های شیشه‌ای جعبه به‌اندازهٔ کافی صلب می‌باشند که شرایط کرنش مسطح را برای جلوگیری از جابه‌جایی‌ها حفظ کنند و اجازهٔ مشاهدهٔ مدل را در زمان ساخت، بارش و بارگذاری می‌دهند. پیش‌از ساخت مدل‌ها، جداره‌های داخلی جعبه به خوبی به روغن آغشته می‌شوند تا اصطکاکِ با ماسه تا حد امکان کاهش یابد. جعبهٔ آزمایش در شکل (۱) نشان داده شده‌است.



شکل ۱ جعبهٔ آزمایش

## مصالح آزمایش

***ماسه.*** ماسهٔ مورد استفاده در این پژوهش از نوع شسته است (شکل ۲). با انجام آزمایش برش مستقیم در حالت خشک و اشباع پارامترهای مقاومتی ماسه مطابق جدول (۱) به‌دست آمده است. در این آزمایش از سه تنش عمودی ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ کیلوگرم بر

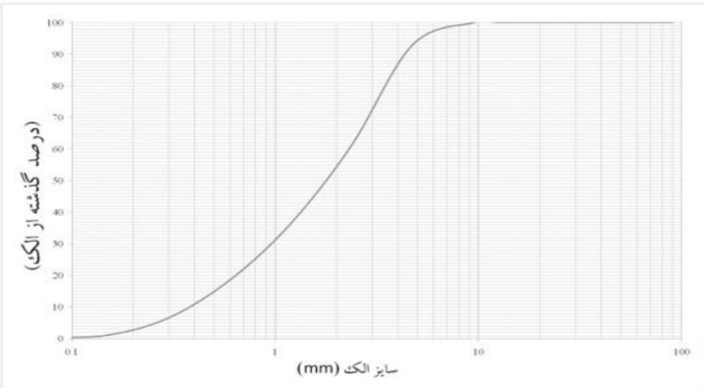
سانتی‌متر مربع استفاده شده‌است و تنش‌های برشی اعمالی هم به‌ترتیب عبارتند از ۰/۳۰۵، ۰/۵٦٦ و ۰/۸۱۱ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع. سرعت دستگاه برش هم ۰/۰۵ میلی‌متر بر دقیقه می‌باشد و ابعاد نمونه هم ۵ × ۵ × ۲ سانتی‌متر است.

دانه‌بندی ماسه توسط روش الک خشک انجام شده و نمودار آن در شکل (۳) آورده شده است (مقدار ریزدانهٔ این ماسه کمتر از ۰/۲۸۵ درصد بوده‌است).

بستر ماسه‌ای در لایه‌های با ضخامت ۵۰ میلی‌متر توسط روش بارش که در آن ماسه از ارتفاع مشخص و کنترل شده‌ای ریخته می‌شود، ساخته شده است تا تراکم یکنواختی در مدل ایجاد شود. تراکمِ خاکریز در طول آزمایش با جمع‌آوری نمونه‌هایی با حجم مشخص در موقعیت‌های مختلفِ جعبهٔ آزمایش کنترل گردیده است. هم‌چنین در زمان اجرا و ساخت شیب‌های خاکی، هیچ‌گونه جابه‌جایی‌های قابل مشاهده‌ای رؤیت نگردیده‌است.



شکل ۲ ماسهٔ شستهٔ استفاده شده در آزمایشگاه




شکل ۳ نمودار دانه‌بندی ماسه

جدول ۱ مشخصات ماسه

| | |
|---|---|
| وزن مخصوص (حالت خشک) | ۱٦ کیلونیوتن بر متر مکعب |
| وزن مخصوص (حالت اشباع) | ۱۸ کیلونیوتن بر متر مکعب |
| زاویهٔ اصطکاک داخلی (حالت خشک) | ٤۰ درجه |
| زاویهٔ اصطکاک داخلی (حالت اشباع) | ۳٦ درجه |
| چسبندگی | ۰ |
| مدول الاستیسیته [٤۰] | ٤۰ مگا پاسکال |
| چگالی ویژه | ۲/٦۵ |
| نسبت پواسن [٤۰] | ۰/۳ |
| حداکثر نسبت تخلخل | ۰/٦ |
| حداقل نسبت تخلخل | ۰/۳ |

***ستون سنگی.*** دانه‌بندی ستون سنگی از ذراتی تشکیل شده است که از الکِ شمارهٔ ۰/۵ اینچ عبور کنند و برروی الک شمارهٔ ٤ باقی مانده باشند (شکل ٤). به کمک آزمایش برش مستقیم زاویهٔ اصطکاک ستون سنگی در حالت خشک ٤۱ درجه و در حالت اشباع ۳۷ درجه به دست آمده است. برای ساخت ستون سنگی معمولی و ستون سنگی مسلح با ورقه‌های افقی ژئوتکستایل، از غلافی پلاستیکی به قطر ۳/٦ استفاده شده‌است (علت انتخاب این قطر برای ستون سنگی، محدودیت عرض جعبه بوده‌است و با انتخاب قطر ۳/٦ سانتی‌متری، تأثیر جداره‌های کناری بر ستون سنگی از بین رفته است). پیش از ساخت مدل، این غلاف پلاستیکی در محل مورد نظر قرار داده می‌شود و در حین ساختِ مدل در هر مرحله، با توجه به میزان وزن مخصوص ستون، شنِ مورد نیاز درون آن ریخته و به وسیلهٔ میلهٔ مخصوصِ کوبش متراکم می‌شود. جدول (۲) خصوصیات فیزیکی شن مورد استفاده در ساخت ستون سنگی را نشان داده است.

جدول ۲ مشخصات شن

| | |
|---|---|
| وزن مخصوص (حالت خشک) | ۱٦ کیلونیوتن بر متر مکعب |
| وزن مخصوص (حالت اشباع) | ۱۹ کیلونیوتن بر متر مکعب |
| زاویهٔ اصطکاک داخلی (حالت خشک) | ٤۱ درجه |
| زاویهٔ اصطکاک داخلی (حالت اشباع) | ۳۷ درجه |
| چسبندگی | ۰ |
| مدول الاستیسیته [40] | ۱۰۰ مگا پاسکال |
| چگالی ویژه | ۲/٦۰ |
| نسبت پواسن [40] | ۰/۲ |
| حداکثر نسبت تخلخل | ۰/۷۵ |
| حداقل نسبت تخلخل | ۰/۳۵ |



شکل ٤ شن استفاده شده در آزمایشگاه

***لایهٔ ژئوتکستایل.*** در این پژوهش از ژئوتکستایل بافته‌نشده استفاده شده‌است، بنا بر اعلامِ شرکت تولیدکنندهٔ آن، مدولِ سختی ژئوتکستایل ٦۰۰۰ کیلونیوتن بر متر و مقدارِ مقاومت کششی آن هم ۲۰ مگاپاسکال می‌باشد. هم‌چنین ضخامتِ این لایه نیز ۲ میلی‌متر است (شکل ۵). جدول (۳) مشخصات ژئوتکستایل را نشان داده است.



شکل ۵ لایهٔ ژئوتکستایل استفاده‌شده در آزمایشگاه

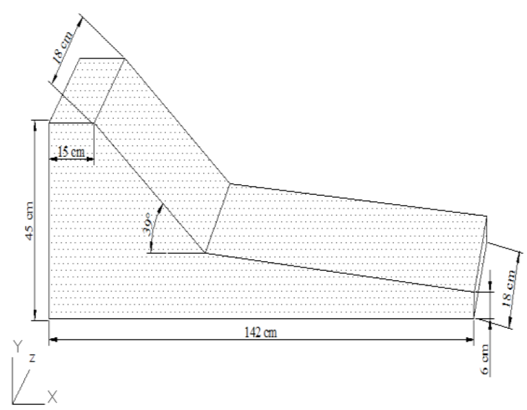
جدول ۳ مشخصات ژئوتکستایل

| | |
|---|---|
| ضخامت | ۲ میلی‌متر |
| مدول الاستیسیته | ۲۰ مگاپاسکال |
| سختی کششی | ٤۰ کیلونیوتن بر متر |

## آزمایش‌های انجام‌شده و ساخت مدل‌ها

مدل‌های مورد نظر با روش بارش ساخته شده‌اند و از طریق جداره‌های شیشه‌ای جعبهٔ آزمایش هم قابل مشاهده‌اند. به‌منظور بررسی اثر ستون سنگی مسلح با لایه‌های افقی ژئوتکستایل در شیب ماسه‌ای، سه نوع مدل

ساخته و مورد مطالعه قرار گرفته‌است. مدل اول ساخت شیروانی خاکی غیرمسلح و سپس انجام عملیاتِ بارش و اشباع نمونه می‌باشد، مدل دوم ساخت شیروانی مسلح به‌کمکِ ستون سنگی در وسطِ شیروانی و انجام عملیات بارش و اشباع آن است و مدل سوم ساخت شیروانی مسلح با ستون سنگی به‌همراهِ لایه‌های افقی ژئوتکستایل در وسطِ شیروانی و انجام عملیات بارش و اشباع نمونه می‌باشد. در هر مرحله از اعمال بار، مدت زمانی این بارهای اعمالی ثابت نگه داشته می‌شوند تا شیب تحت اثرِ آن بار به تعادل برسد، سپس گام بعدی بارگذاری انجام می‌شود. مشخصات و شرایطی که در زیر ارائه می‌شود برای هر سه مدل مشابه و یکسان می‌باشند. هندسهٔ کلی مدل‌ها در شکل (٦) نشان داده شده‌است.

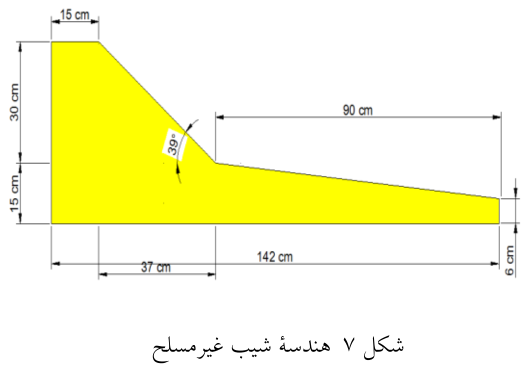



شکل ٦ هندسهٔ کلی مدل‌ها

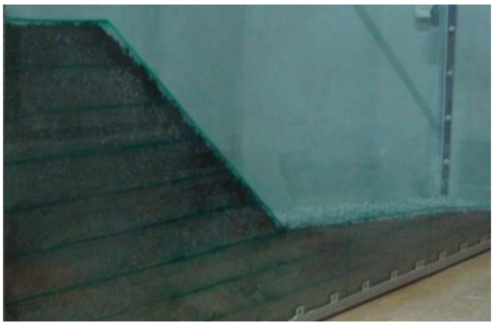
١. برای از بین بردن اثر اصطکاکِ جداره‌های جعبه، پیش‌از شروع کار آنها به روغن آغشته می‌شوند تا اصطکاکِ آنها با ماسه تا حدِ ممکن، از بین برود.
٢. طول تاج شیروانی در هر سه مدل ۱۵ سانتی‌متر انتخاب گردیده است و زاویهٔ شیب هم باتوجه به زاویهٔ اصطکاک داخلی ماسهٔ خشک (۴۰ درجه) ۳۹ درجه بوده است. ارتفاع شیب ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع کلی مدلِ ساخته‌شده ۴۵ سانتی‌متر بوده است.
٣. پس از ساخت مدل، برای جلوگیری از آبشستگیِ سطح شیروانی از یک لایهٔ نازکِ دوغاب روی سطح شیب استفاده شده است.
٤. اشباع کردن مدل به کمک بارش مصنوعی صورت گرفته است و دبی بارش ۲ لیتر بر دقیقه بوده است.
٥. عملیات زهکشی و خروج آب مخزن از طریق قسمتِ پایین‌دست جعبهٔ آزمایش انجام می‌شود.
٦. قطر ستون سنگی ۳/٦ سانتی‌متر بوده‌است و به‌اندازهٔ ۵ سانتی‌متر از کفِ جعبه فاصله دارد.
٧. خاکریز ماسه‌ای به‌صورت یک‌لایه‌ای اجرا شده است و وزن مخصوص شیب و ستون سنگی ١٦ کیلونیوتن بر مترمکعب می‌باشد.

## شیروانی غیرمسلح

هندسهٔ این شیب در شکل (۷) نشان داده شده‌است. در ابتدا جداره‌های داخلی شیشه روغن‌کاری شده‌اند و پس‌از ساخت شیروانیِ غیرمسلح (شکل ۸)، شیروانی از نظر پایداری بدون مشکل بوده‌است؛ سپس مدل تحت بارش مصنوعی قرار داده شده است. این شیروانی پس از گذشت حدود ۴۰ دقیقه از فرآیندِ اشباع، دچار ترک‌هایی در وسط شیروانی گردیده و پس از گذشت دقایقی گسیختگی کامل در آن رخ داده است. شکل (۹) گسیختگیِ کامل شیروانی غیرمسلح را در اثر اشباع کامل نشان داده است.




شکل ۷ هندسهٔ شیب غیرمسلح



شکل ۸ مدلِ شیب غیرمسلح

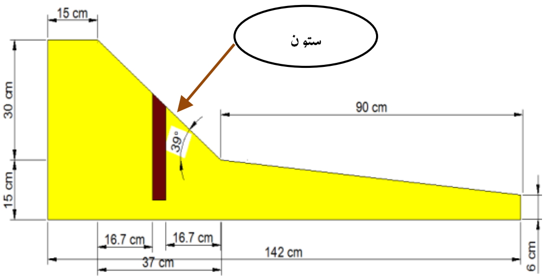


شکل ۹ گسیختگی شیب غیرمسلح

## شیروانی مسلح با ستون سنگی معمولی

باتوجه به تحقیقات انجام‌شده [41]، موقعیتِ بهینه برای قرارگیری ستون سنگی، در وسط شیروانی می‌باشد؛ به همین دلیل برای انجام آزمایش در شیروانیِ مسلح، ستون سنگی در وسطِ شیروانی قرار داده شده است. برای این کار ابتدا جداره‌های داخلی شیشهٔ جعبه و جداره‌های داخلی و خارجی غلافِ ستون به روغن آغشته شده است (به‌منظور تسهیل در بیرون کشیدنِ غلاف پس‌از اتمامِ ساخت). پیش‌از آغاز کار، غلاف مورد نظر در محل مشخص‌شده (روی لایهٔ ۵ سانتی‌متری اول) قرار داده می‌شود و همراه هر لایه خاکریزی و تراکم، شن درون غلاف ریخته می‌شود و متراکم می‌گردد. پس‌از اتمام ساختِ مدل، به‌آرامی و با احتیاط کامل غلاف بیرون کشیده می‌شود. اشکال (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) به‌ترتیب هندسهٔ شیب، مدل ساخته‌شده و موقعیت قرارگیری ستون سنگی را نشان می‌دهند.

پس‌از تکمیل ساخت مدل، شیروانی تحت بارش مصنوعی قرار داده می‌شود و پس‌از اشباعِ کامل و با گذشت بیش از ۹۰ دقیقه هیچ‌گونه ترکی در شیروانی روی نمی‌دهد؛ پس می‌توان نتیجه گرفت پس‌از مسلح کردن با ستون سنگی ضریب اطمینانِ شیروانی افزایش یافته است. برای ایجاد گسیختگی، شیروانی تحت بارگذاری به‌صورت تدریجی قرار داده می‌شود (سرعت بارگذاری در حدود $\frac{1\ \text{Kg}}{10\ \text{min}}$ بوده است). شیروانی به‌صورت تدریجی بارگذاری می‌شود و بدون فروپاشی مقاومت بسیار خوبی از خود نشان می‌دهد. پس‌از بارگذاری روی تاج شیب، شیروانی در فشار ۶/۰۶۰ کیلوپاسکال دچار گسیختگی می‌گردد. در شکل (۱۳) سطح لغزشِ شیب گسیخته شده را می‌توان مشاهده کرد.



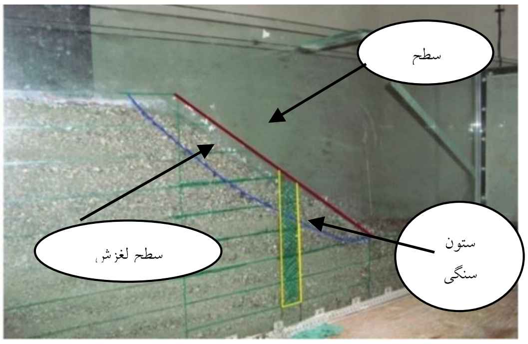

شکل ۱۰ هندسهٔ شیب مسلح با ستون سنگی معمولی



شکل ۱۱ مدل شیب مسلح با ستون سنگی معمولی



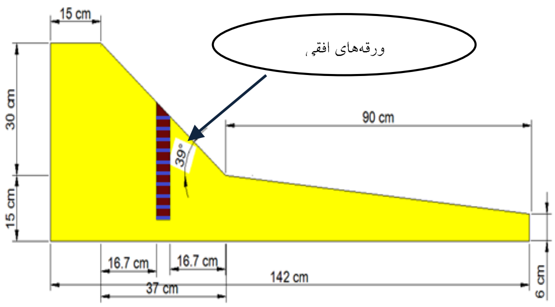
شکل ۱۲  موقعیت قرارگیری ستون سنگی (وسط شیب)




شکل ۱۳  گسیختگی شیب مسلح با ستون سنگی معمولی

## شیروانی مسلح با ستون سنگیِ تسلیح‌شده با لایه‌های افقی ژئوتکستایل

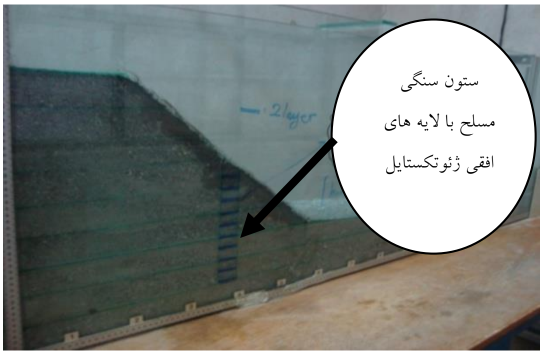
هندسهٔ شیب در شکل (١٤) نشان داده شده‌است. برای انجام این آزمایش همانند قبل، ستون سنگی مسلح در وسط شیب قرار داده می‌شود. پیش از آغاز کار، لایه‌های ژئوتکستایل با مقطع دایره‌ای به قطر ٣/٦ سانتی‌متر بریده می شوند ( شکل ١٥). این شیب مسلح با همان غلافِ پلاستیکی که برای ساخت ستون سنگی معمولی استفاده شد، ساخته شده‌است و پس از هر دو سانتی‌متر ریختن شن در غلاف، دو صفحهٔ افقی ژئوتکستایل بالای لایهٔ شن قرار داده می شوند و گام بعدی که ریختن و تراکم شن است انجام می‌گیرد (شکل ١٦). پس از تکمیل ساخت، مدل تا اشباعِ کامل در معرض بارش مصنوعی قرار می‌گیرد و پس از گذشت بیش از ۸۰ دقیقه، همانند حالت شیب مسلح با ستون سنگی معمولی هیچ ترکی در این مرحله مشاهده نمی‌شود و شیب کاملاً پایدار باقی می ماند. در گام بعدی، شیب تحت بارگذاری تدریجی قرار می‌گیرد (نرخ بارگذاری مشابه مدل پیشین بوده است). پس از بارگذاری تدریجی روی تاج، سرانجام شیب در فشار ۹/۰۹۰ کیلوپاسکال دچار گسیختگی می‌شود (ابتدا در وسط شیب و در محل ستون سنگی مسلح ترک عرضی ایجاد می‌شود و درنهایت گسیختگی کامل در مدل اتفاق می‌افتد). شکل (١٧) سطح لغزش و جابه‌جایی ستون سنگی در شیب گسیخته شده را نشان می‌دهد.



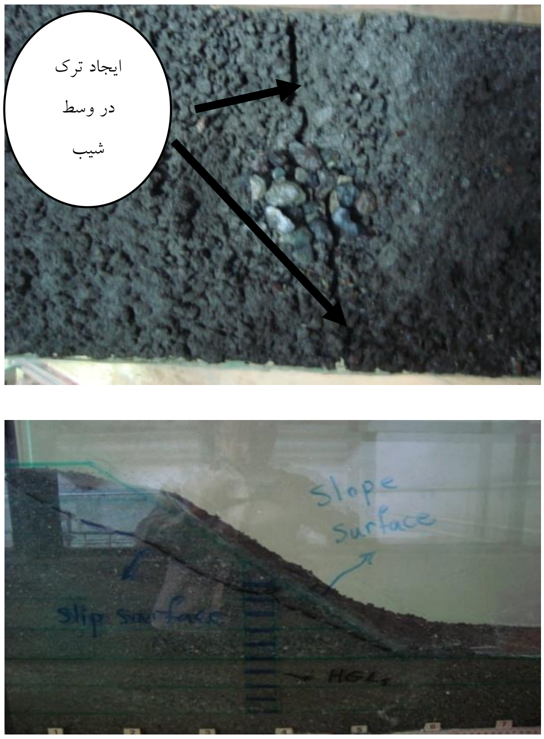

شکل ١٤  هندسهٔ شیب مسلح با ستون سنگی تسلیح شده با ژئوتکستایل



شکل ١٥  ورقه‌های افقی ژئوتکستایلِ مورد استفاده در تسلیح ستون سنگی




شکل ۱۶ نحوهٔ ساخت شیب مسلح با ستون سنگی مسلح




شکل ۱۷ ایجاد ترک و گسیختگیِ کامل شیب مسلح با ستون سنگی تسلیح‌شده با ژئوتکستایل

## تحلیل‌های عددی با نرم‌افزارِ FLAC3D

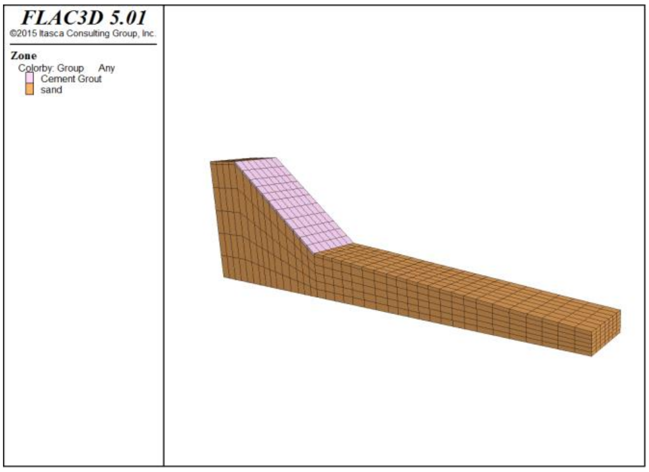
تحلیل‌های عددی به روش تفاضل محدودِ سه‌بعدی و با نرم‌افزار FLAC3D صورت گرفته است و مدل‌سازی برای هر سه حالتِ شیب غیرمسلح، شیب مسلح با ستون سنگی معمولی و شیب مسلح با ستون سنگی تسلیح شده با ورقه‌های افقی ژئوتکستایل انجام شده است. نتایج تحلیل‌های عددی به خوبی تصدیق کنندهٔ نتایج مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی می‌باشند. ویژگی شیب‌های مدل‌شده در نرم‌افزار در جدول شماره (٤) نشان داده شده است.

جدول ٤ خصوصیات ژئومکانیکی مصالح در مدل‌سازی‌های عددی

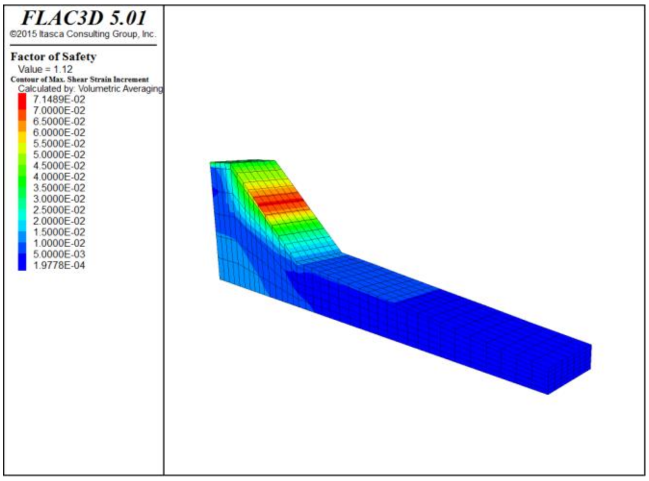
| | |
|---|---|
| وزن مخصوص ماسهٔ خشک | ١٦ کیلونیوتن بر متر مکعب |
| وزن مخصوص ماسهٔ اشباع | ١٨ کیلونیوتن بر متر مکعب |
| وزن مخصوص ستون سنگی خشک | ١٦ کیلونیوتن بر متر مکعب |
| وزن مخصوص ستون سنگی اشباع | ١٩ کیلونیوتن بر متر مکعب |
| مدول بالک ماسه | $۳/۳\times۱۰^{۷}$ نیوتن بر متر مربع |
| مدول برشی ماسه | $۱/۵\times۱۰^{۷}$ نیوتن بر متر مربع |
| مدول بالک ستون سنگی | $۵/٦\times۱۰^{۷}$ نیوتن بر متر مربع |
| مدول برشی ستون سنگی | $٤/۲\times۱۰^{۷}$ نیوتن بر متر مربع |
| چسبندگی ماسه | ۰ |
| زاویهٔ اصطکاک ماسهٔ خشک | ٤۰ درجه |
| زاویهٔ اصطکاک ماسهٔ اشباع | ۳٦ درجه |
| چسبندگی ستون سنگی | ۰ |
| زاویهٔ اصطکاک ستون سنگی خشک | ٤۱ درجه |
| زاویهٔ اصطکاک ستون سنگی اشباع | ۳۷ درجه |
| مدول بالک ژئوتکستایل | $۲/۰\times۱۰^{۹}$ نیوتن بر متر مربع |
| مدول برشی ژئوتکستایل | $۱/۲\times۱۰^{۹}$ نیوتن بر متر مربع |
| تنش کششی ژئوتکستایل | $۲/۰\times۱۰^{۷}$ نیوتن بر متر مربع |

## تحلیل عددی شیروانی غیرمسلح

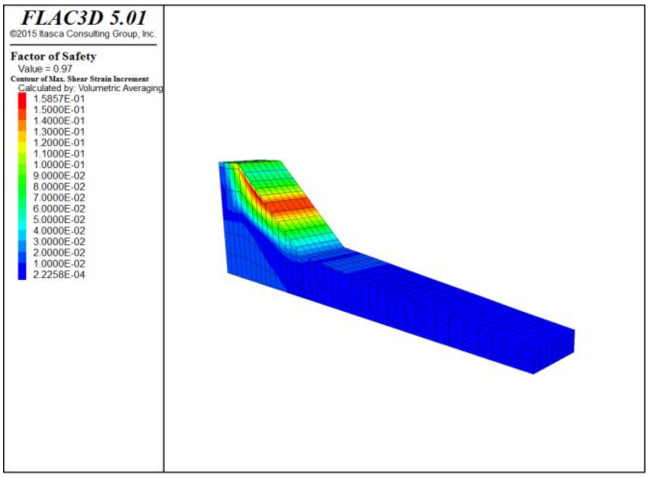
مدل شیب غیر مسلح در تحلیل عددی در شکل (۱۸) نشان داده شده است. پس از مدل‌سازی شیروانی غیر مسلح در حالت خشک مقدار ضریبِ اطمینان ۱/۱۲ به‌دست می‌آید (شکل ۱۹) و شیروانی در این حالت پایدار است. سپس شیروانی در حالت اشباع مدل‌سازی می‌شود؛ در حالت اشباع شیروانی دچار گسیختگی می‌گردد و مقدار ضریب اطمینان آن ۰/۹۷ به‌دست می‌آید (شکل ۲۰). این دو مورد دقیقاً همانند آن چیزی است که در آزمایشگاه مشاهده گردیده است.




شکل ۱۸ شیب غیر مسلح در تحلیل عددی




شکل ۱۹ تحلیل و مقدار ضریب اطمینان شیب غیر مسلح خشک

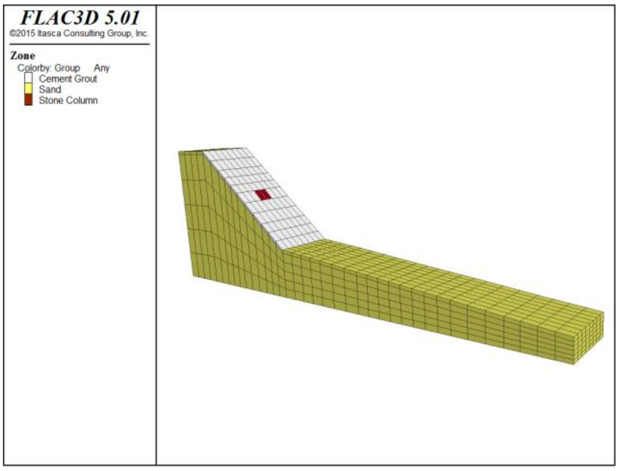



شکل ۲۰ تحلیل و مقدار ضریب اطمینان شیب غیر مسلح اشباع (بدون بارگذاری)

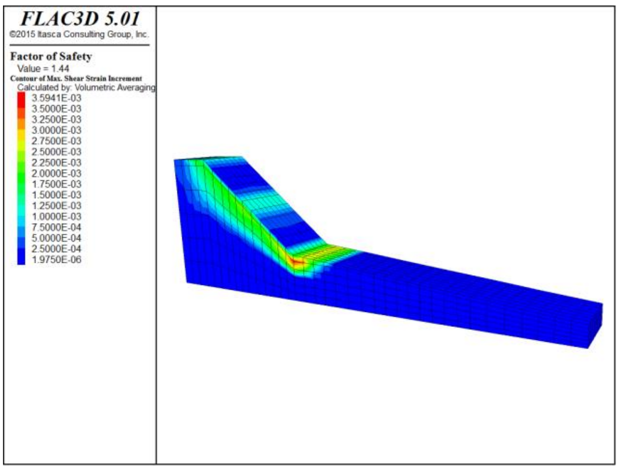
## تحلیل شیروانی مسلح با ستون سنگی معمولی

در گام بعدی شیروانی مسلح با ستون سنگی معمولی مورد تحلیلِ عددی قرار می‌گیرد (مدل تحلیلی این شیب در شکل (۲۱) نشان داده شده است). در این مدل، ستون سنگی به‌صورت یک المان مکعبِ مربع مدل شده است که صحتِ این فرضِ قبلاً به اثبات رسیده است [24, 42]. ابتدا شیروانی مسلح در حالت خشک تحلیل می‌شود و مقدار ضریب اطمینان آن ۱/٤٤ به‌دست می‌آید (شکل ۲۲). سپس شیب در حالت اشباع تحلیل می‌شود که مقدار ضریب اطمینان آن ۱/۲٤ محاسبه شده است (شکل ۲۳). در مرحلهٔ آخر تحلیلِ این شیب در حالت بارگذاریِ تاج آن با همان مشخصات انجام می‌شود و بارِ بحرانی برای ایجادِ گسیختگیِ شیروانی ۵/۸۵۰ کیلوپاسکال به‌دست می‌آید (شکل ٢٤).

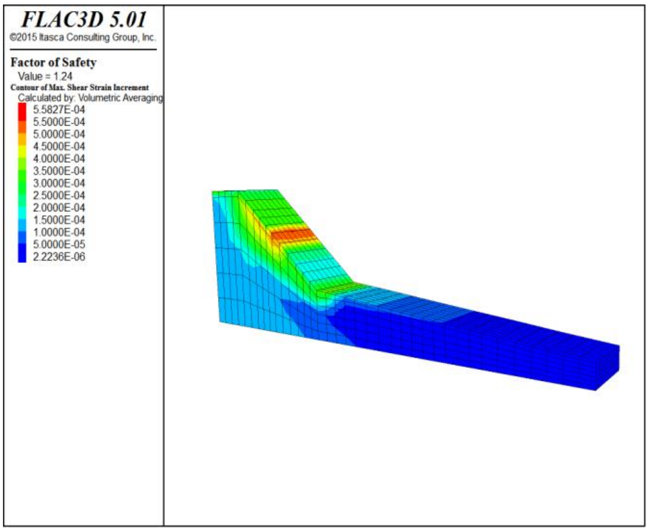
در آزمایشگاه مقدار تنشی که سبب گسیختگی شیروانی می‌شود، ٦/۰٦۰ کیلوپاسکال است و این مقدار در تحلیلِ عددی ۵/۸۵۰ به‌دست آمده‌است و اختلاف آنها کمتر از ۱ در صد می‌با شد. مدل سازی آزمایشگاهی دارای برخی خطاهای غیر قابل کنترل می‌باشد ازجمله تأثیر جداره‌های کناری (حتی در حالت آغشته شده به روغن)، عملکرد زهکشی ستون سنگی و نیز فرض مکعبی بودن ستون سنگی در نرم‌افزار درحالی‌که در آزمایشگاه ستون سنگی به‌صورت استوانه‌ای بوده است.



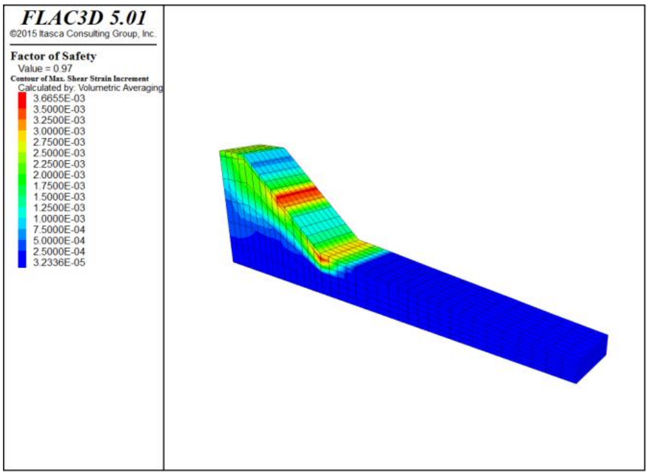

شکل ۲۱ شیب مسلح در تحلیل عددی




شکل ۲۲ تحلیل و مقدار ضریب اطمینان شیب مسلح با ستون سنگی معمولیِ خشک




شکل ۲۳ تحلیل و مقدار ضریب اطمینان شیب مسلح با ستون سنگی معمولی اشباع

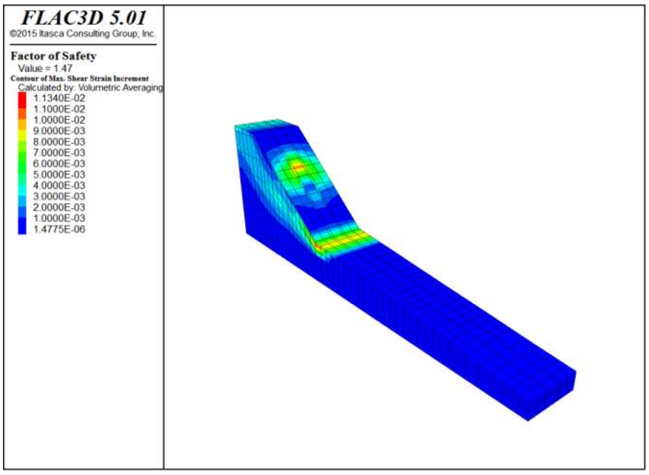



شکل ٢٤ تحلیل و مقدار ضریب اطمینان شیب مسلح ستون سنگی معمولی اشباع با بارگذاری (بار بحرانی ۵/۸۵۰ کیلوپاسکال)

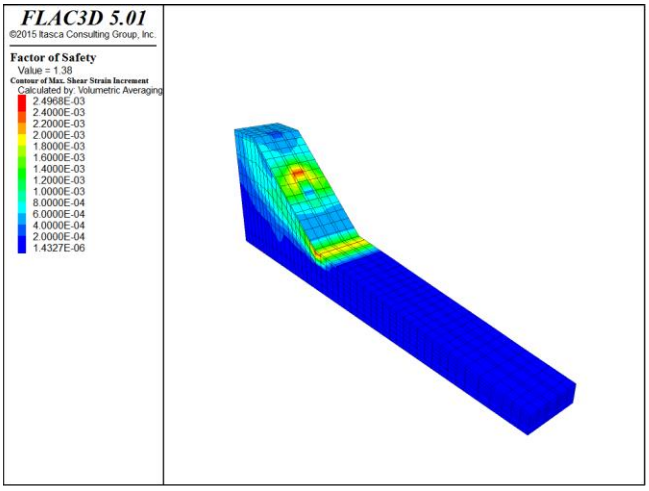
## تحلیل شیروانی مسلح با ستون سنگی تسلیح‌شده با ورقه‌های افقی ژئوتکستایل

در گام سوم، شیب مسلح با لایه‌های افقی ژئوتکستایل تحلیل و بررسی می‌شود. در این مدل، ستون سنگی به‌صورت المان مربعی با لایه‌های افقی ژئوتکستایل درون آن مدل‌سازی می‌گردد. در ابتدا، شیب خشک تحلیل می‌شود و مقدار ضریب اطمینان ١/٤٧ به‌دست می‌آید (شکل ۲۵). سپس شیب اشباع مدل‌سازی می‌شود و ضریب اطمینانِ آن ۱/۳۸ به‌دست می‌آید (شکل ٢٦). در مرحلهٔ آخر، شِیب تحت شرایط بارگذاری با همان مشخصات تحلیل می‌شود و بار بحرانی برای گسیختگی شیب مقدار ۸/۲۷۸ کیلوپاسکال به‌دست می‌آید (شکل ۲۷).

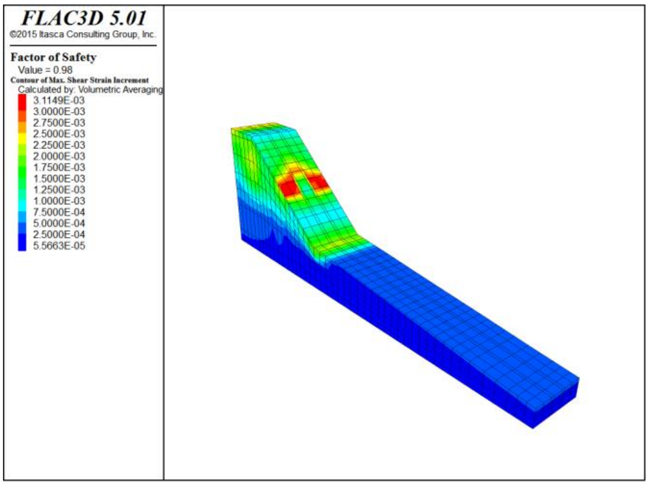
در آزمایشگاه مقدار باری که سبب گسیختگی این شیب شده‌است، ۹/۰۹۰ کیلوپاسکال بوده‌است و این مقدار در حالت تحلیل عددی ۸/۲۷۸ به‌دست آمده‌است. این مقادیر تطابقِ بسیار خوبی با یکدیگر دارد. نتایج تحلیل‌های عددیِ و آزمایشگاهی در جدول (۵) ارائه شده است.




شکل ۲۵ تحلیل و مقدار ضریب اطمینان شیب مسلح با ستون سنگی مسلح خشک




شکل ۲٦ تحلیل و مقدار ضریب اطمینان شیب مسلح با ستون سنگی مسلح اشباع




شکل ۲۷ تحلیل و مقدار ضریب اطمینان شیب مسلح ستون سنگی مسلح اشباع با بارگذاری (بار بحرانی ۸/۲۷۸ کیلوپاسکال)

جدول ۵ ظرفیت باربری شیب‌ها در مدل‌سازی‌های عددی و آزمایشگاهی

| | مدل‌سازی آزمایشگاهی | تحلیل عددی |
|---|---|---|
| شیب غیر مسلح در حالت اشباع | ناپایدار | ناپایدار |
| ظرفیت باربری شیب غیر مسلح در حالت اشباع | ۰ | ۰ |
| شیب مسلح با ستون سنگی معمولی در حالت اشباع | پایدار | پایدار |
| ظرفیت باربری شیب مسلح با ستون سنگی معمولی در حالت اشباع | ۶/۰۶۰ کیلوپاسکال | ۵/۸۵۰ کیلوپاسکال |
| شیب مسلح با ستون سنگی تسلیح شده با ژئوتکستایل در حالت اشباع | پایدار | پایدار |
| ظرفیت باربری شیب مسلح با ستون سنگی تسلیح شده با ژئوتکستایل در حالت اشباع | ۹/۰۹۰ کیلوپاسکال | ۸/۲۷۸ کیلوپاسکال |

## اثرات مقیاس و تحلیل ابعادی

واضح است که به‌دلیل اثرات مقیاس و طبیعت خاک‌ها (به‌ویژه خاک‌های ماسه‌ای)، خاک‌ها ممکن است همان نقشی را که در مدل‌های آزمایشگاهی ایفا می‌کنند در نمونهٔ اصلی نداشته باشند. این تفاوت‌ها در ابتدا به‌علت تفاوت در تراز تنش بین آزمایش‌های مدلی و آزمایش‌های صحرایی اتفاق می‌افتاد [43]. با توجه به این موضوع سواف [44] پیشنهاد کرده است که استفاده از مدل‌های 1-g می‌تواند فقط در پیش‌بینی‌های رفتارهای کلی نمونه‌های اصلی به‌کار برود. هجد و سیت‌هارام [45] توضیح داده‌اند که آزمایش‌های کوچک مقیاس در شرایط 1-g به‌دست‌یابی تقریبِ مناسب اطلاعات درمورد رفتار کلی نمونه‌های اصلی، سریع‌تر و ساده‌تر از آزمایش‌های بزرگ‌مقیاس کمک می‌کنند، هرچند که آزمایش‌های بزرگ‌مقیاس کنترل بهتری درمورد پارامترهای کلیدی نمونهٔ مورد نظر دارند. نکتهٔ مهم در این زمینه این است که نتایج آزمایش‌های کوچک مقیاس متأثر از اثراتِ مقیاس هستند و نتایج به‌دست آمده در شرایط آزمایش‌های 1-g مستقیماً برای حالت نمونهٔ اصلی قابل کاربرد نیستند. همان‌طور که توسط فاخر و جونز [46] پیشنهاد شده است، نتایج آزمایش‌های کوچک‌مقیاس را می‌توان با استفادهٔ دقیق از قوانین مقیاس برای نمونه‌های اصلی هم به‌کار برد. آنان هم‌چنین هشدار می‌دهند که به‌دلیل دخالت عوامل پیچیده و متعدد در این زمینه، ایجاد شرایط کاملاً مشابه بین مدل آزمایشگاهی و نمونهٔ اصلی امکان‌پذیر نمی‌باشد و باید تصمیم‌گیری درمورد عواملِ مؤثر در اثرات مقیاس به قضاوتِ محققان در این زمینه واگذار شود.

## بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تعدادی مدل‌سازی آزمایشگاهی برای شیب ماسه‌ای مسلح با ستون سنگی معمولی و ستون سنگی تسلیح‌شده با پوشش ژئوتکستایل انجام شده است و نتایج حاصل با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود سه‌بعدی صحت‌سنجی شده‌اند. ستون سنگی مسلح‌شده با ژئوتکستایل ظرفیتِ باربری شیروانی را نسبت‌به حالت ستون سنگی معمولی در حدود ۱/۵ برابر افزایش داده و پایداری شیب را به اندازه‌ای در حدودِ ۵۰ درصد بهبود بخشیده است. این افزایشِ ظرفیت باربری شیب ناشی از مقاومتِ کششی و مدول الاستیسیتهٔ بالایی می‌باشد که ورقه‌های ژئوتکستایل برای ستون سنگی فراهم می‌کنند. ستون سنگی مانعِ توسعهٔ صفحهٔ گسیختگی می‌شود و در برابر تغییر شکل‌های جانبی به‌دلیل جابه‌جاییِ محل ستون سنگی در حین بارگذاری مقاومت می‌کند. استفاده از مسلح‌کنندهٔ ژئوتکستایل به‌شکل ورقه‌های افقی، مقاومت در برابر بارهای اعمالی را به خوبی

افزایش می‌دهد و پایداری شیب را بهبود می‌بخشد. استفاده از لایه‌های افقی ژئوتکستایل درونِ ستون سنگی تغییری در حالت شکست ستون ایجاد نمی‌کند و شکست هر دو ستون سنگی (ستون سنگی معمولی و ستون سنگی مسلح با ژئوتکستایل) به‌صورت گسیختگی برشی می‌باشد. استفاده از ستون سنگی مسلح با ژئوتکستایل، یک روش مفید و کارآمد می‌باشد که علاوه‌بر سادگی و راحتی اجرا، توانایی تثبیت شیب‌های در معرض خطر را به‌خوبی دارا می‌باشد.

با این حال، رفتارِ شیب‌های طبیعی ممکن ا ست با آنچه که در این پژوهش انجام گرفته اســـت متفاوت باشـــد، به همین منظور تحقیقات بیشـــتر در این زمینه و اســـتفاده از آزمایش های دیگری همچون آزمایش های بزرگ‌مقیاس پیشنهاد می‌شود.

## مراجع


1. Fattah, M. Y. and Majeed, Q. G., "Finite Element Analysis of Geogrid Encased Stone Columns", Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 30, Pp. 713-726, (2012).
2. Ambily, A. P. and Gandhi. S. R., "Behavior of Stone Columns Based on Experimental and FEM Analysis", *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 133, (2007).
3. Aboshi, H., Ichimoto, E., Enoki, M. and Harada, K., "The Composer - A Method to Improve Characteristics of Soft Clay by Inclusion of Large Diameter Sand Columns", *Proceedings of the International Conference on Soil Reinforcement: Reinforced Earth and other Techniques*, Paris, Vol. 1, Pp. 211-216, (1979).
4. Xanthakos, P. P., Amberson, L. W. and Bruce, D., "Ground Control and Improvement", New York, John Wiley & Sons, (1994).
5. Vekli, M., Aytekin, M., Ikizler, S. B. and Calik, U., "Experimental and Numerical Investigation of Slope Stabilization by Stone Columns", *Natural Hazards*, Vol. 64, No. 1, Pp. 797-820, (2012).
6. Rao, B. G. and Bhandari, R. K., "Skirting - A New Concept in Design of Heavy Storage Tank Foundation", *Proceedings of the 6$^{th}$ South-East Conference on soil Engineering*, Taipei, Taiwan, Pp. 283-300, (1980).
7. Juran, I. and Riccobono, O., "Reinforced Soft Soils with Artificially Cemented Compacted-sand Columns", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 7, Pp. 1042-1060, (1991).
8. Sharma, R. S., Kumar, B. R. P., and Nagendra, G., "Compressive Load Response of Granular Piles Reinforced with Geogrids", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 41, No. 1, Pp. 187-192, (2004).
9. Gniel. J. and Bouazza A., "Improvement of Soft Soils Using Geogrid Encased Stone Columns", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 27, Pp. 167-175, (2009).
10. Van Impe, W. F., "Soil Improvement Techniques and Their Evolution", Balkema, Rotterdam, The Netherlands, (1989).
11. Katti, R. K., Katti, A. R. and Naik, S., "Monograph to Analysis of Stone Columns with and Without Geosynthetic Encasement", CBIP Publication, New Delhi, (1993).

12. Al-Joulani, M. A., "Laboratory and Analytical Investigation of Sleeve Reinforced Stone Columns", Ph.D. Thesis, Carleton Univ., Ottawa, Ontario, Canada, (1995).

۱۳. فردوسی شاهاندشتی، آتنا، مقدس‌نژاد، فریدون، افلاکی، اسماعیل، «بررسی عددی پایداری دیوارهای خاکی مسلح با ژئوسنتتیک»، نشریهٔ مهندسی عمران دانشگاه فردوسی مشهد، سال ۲۷، ش. ۱، (۱۳۹٤).

۱٤. بدو، کاظم، امامی، رقیه، «پیش‌بینی و چگونگی در اختیار گرفتن نشست خاکریز ساخته شده روی پی سست با مسلح سازی به‌کمک ژئوتکستایل (مطالعهٔ موردی بزرگراه شهید کلانتری)»، نشریهٔ مهندسی عمران دانشگاه فردوسی مشهد، سال ۲۲، ش. ۲، (۱۳۹۰).

15. Raithel, M. and Kempfert, H. G., "Calculation Models for Dam Foundations with Geotextiile Coated Sand Columns", *Proceedings of the International Conference on Geotechnical and Geological Engineering*, Melbourne, (2000).

16. Raithel, M., Kempfert, K. G. and Kirchner, A., "Geotextile- Encased Columns (GEC) for foundation of a dike on very soft soils", *Proceedings of the 7th International Conference on Geosynthetics, Nice,* France, Pp. 1025-1028, (2002).

17. Raithel, M., Kuster, V., and Lindmark, A., "Geotextile encased columns - A Foundation System for Earth Structures, Illustrated by a Dyke Project for a Works Extension in Hamburg", Nordic Geotechnical Meeting NGM 2004, Ystad, Sweden. (2004).

18. Raithel, M. and Kirchner, A., "Caculation Techniques and Dimensioning of Encased Columns - Design and State of the Art", *Proceedings of the 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics,* June 17-20, Sanghai, China, (2008).

19. Pulko, B., Majes, B., Logar, J., "Geosynthetic-encased Stone Columns: Analytical Calculation Model", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 29, Pp. 29-39 (2011).

20. Murugesan, S. and Rajagopal, K., "Model Tests on Geosynthetic Encased Stone Columns", *Journal of the Geosynthetics International,* Vol. 14, No. 6, Pp. 346-354, (2007).

21. Malarvizhi, I., "Comparative Study on the Behavior of Encased Stone Column and Conventional Stone Column", *Soil and Foundations. Japanese Geotechnical Society*, Vol. 47, No. 5, Pp. 873-855, (2007).

22. Lo, S. R., Zhang, R. and Mak, J., "Geosynthetic-encased Stone Columns in Soft Clay: A Numerical Study", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 28, No. 3, Pp. 292- 302, (2010).

23. Khabazian, M., Kaliakin, V. N. and Meehan, C. L., "3D Numerical Analyses of Geosynthetic Encased Stone Columns", *ASCE Conference Proceedings*, Pp. 201-208, (2010).

24. Keykhosropur, L., Soroush, A. and Imam, R., "3D Numerical Analyses of Geosynthetic Encased Stone Columns", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 35, Pp. 61-68, (2012).

25. Almeida, M. S. S., Hosseinpour, I. and Riccio, M., "Performance of a Geosynthetic Encased Column (GEC) in Soft Ground: Numerical and Analytical Studies", Geosynthetics International, Vol. 20, No. 4, Pp. 252-262, (2013).

26. Elsawy, M .B. D., "Behaviour of Soft Ground Improved by Conventional and Geogrid-encased Stone Columns, Based on FEM Study", Geosynthetics International, Vol. 20, No. 4, Pp. 276-285, (2013).
27. Kempfert, H. G., Raithel, M. and Jaup, A., "Model Tests for Analysis of the Bearing and Deformation Behavior of Column Foundations", Proceedings of 12th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Geotechnical Engineering for Transportation Infrastructure, Balkema, Rotterdam, Pp. 1521-1526, (1999).
28. Raithel, M. and Kempfert, H. G., "Calculation Models for Dam Foundations with Geosynthetic Coated Sand Columns", *Proceedings of International Conference on Geotechnical & Geological Engineering.* GeoEng, Melbourne Australia, Pp. 347-352, (2000).
29. Geduhn, M., Raithel, M. and Kempfert, H. G., "Practical Aspects of the Design of Deep Geosynthetic Coated Sand Columns for the Foundation of a Dike on Very Soft Soils", Proceedings of 4th International Symposium on Earth Reinforcement: Landmarks in Earth Reinforcement, Vol. 1, Pp. 545-548. Fukuoka, Kyushi, Japan, (2001).
30. Alexiew, D., Brokemper, D. and Lothspeich, S., "Geosynthetic Encased Columns (GEC): Load Capacity, Geosynthetic Selection and Pre-design Graphs", Contemporary Issues in Foundation Engineering. ASCE, New York, USA, Pp. 497-510. Geotechnical Special Publication, No. 131, (2005).
31. Black, J. A., Sivakumar, V., Madhav, M. R. and Hamill, G. A., "Reinforced Stone Columns in Weak Deposits: Laboratory Model Study", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 133, No. 9, Pp. 1154-1161, (2007).
32. Wu, C. S., Hong, Y. S. and Lin, H. C., "Axial Stress-relation of Encapsulated Granular Column" Computers and Geotechnics, Vol. 36, No. 2, Pp. 226-240, (2008).
33. Joel, G. and Abdelmalek, B., "Improvement of Soft Soils Using Geogrid Encased Stone Columns", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 27, No. 3, Pp. 167-175, (2009).
34. Zhang, Y. P., Li, T. and Wang, Y., "Theoretical Elastic Solutions for Foundations Improved by Geosynthetic-encased Columns", Geosynthetics International, Vol. 18, No. 1, Pp. 12-20, (2011).
35. Kempfert, H. G., "Ground Improvement Methods with Special Emphasis on Column-type Techniques", In: International Workshop on Geotechnics of Soft Soils - Theory and Practice, Netherlands, Pp. 101–112, (2003).
36. Murugesan, S. and Rajagopal, K., "Studies on the Behavior of Single and Group of Geosynthetic Encased Stone Columns", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE Vol. 136, No. 1, Pp. 129-139, (2010).
37. Hosseinpour, I., Riccio. M. and Almeida, M. S. S., "Numerical Evaluation of Granular Column Reinforced by Geosynthetics Using Encasement and Laminated Disks", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 42, No. 4, Pp. 363-373, (2014).

38. NazariAfshar, J. and Gazavi, M., "Experimental Studies on Bearing Capacity of Geosynthetic Reinforced Stone Columns", *Arabian Journal of Science and Engineering,* Vol. 39, Pp. 1559-1571, (2014).
39. Hong, Y. S., Wu, C. S. and Yu, Y. S., "Model Tests on Geotextile-encased Granular Columns under 1-g and Undrained Conditions", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 44, Pp. 13-27, (2016).
40. Das, B. M., "Advanced Soil Mechanics", Fourth edition, CRC Press.
41. Hajiazizi, M. and Mazaheri, A. R., "Use of Line Segments Slip Surface for Optimized Design of Piles in Stabilization of Earth Slopes", International Journal of Civil Engineering, No. 1, Transaction B: Geotechnical engineering, Vol. 13, (2015).
42. Murugesan, S. and Rajagopal, K., "Geosynthetic-encased Stone Columns: Numerical Evaluation", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 24, Pp. 349-358, (2006).
43. Vesic, A. S., "Analysis of Ultimate Loads of Shallow Foundations", Soil Mechanics and Foundation, Vol. 99, No. 1, Pp. 45-73, (1973).
44. Sawwaf, M., "Strip Footing Behavior on Pile and Sheet Pile-stabilized Sand Slope", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,* Vol. 131, No. 6, Pp. 705-715, (2005).
45. Hegde, A. M. and Sitharam, T. G., "Experimental and Numerical Studies on Protection of Buried Pipeline Sand Underground Utilities Using Geocells", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 43, No. 5, Pp. 372-381, (2015).
46. Fakher, A. and Jones, C. J. F. P., "Discussion on Bearing Capacity of Rectangular Footings on Geogrid Reinforced Sand. by Yetimoglu, T., Wu, J. T. H., Saglamer, A., 1994", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 122, Pp. 326-327, (1996).